

文章编号:1006-9941(2019)06-0493-08

## 发射药混同过程静电性能测试及风险评估

卫水爱<sup>1,2</sup>, 孙磊<sup>2</sup>, 李文海<sup>2</sup>, 李春光<sup>2</sup>, 白春华<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 兵器工业安全技术研究所, 北京 100053)

**摘要:** 为评估发射药混同过程中的静电灾害风险, 预防事故发生, 自主设计了电阻率、介电常数、电荷积累量等静电参数测试装置, 并以 11/7 单基发射药为典型产品进行测试实验, 得到其体积电阻率为  $1.87 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ , 表面电阻率为  $1.06 \times 10^{12} \Omega$ , 介电常数为 1.88, 滑槽摩擦状态饱和荷质比为  $-1.85 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 采用 ANSOFT MAXWELL 软件对 11/7 发射药混同料筒内的静电场进行仿真计算, 得到了直径 1000 mm 混同料筒内 11/7 发射药最大静电场强随药面高度的变化曲线, 结果表明随着药面高度的增加, 料筒内电场强度不断增大, 当药面高度达到 40 mm 时, 料筒内电场强度已达到空气击穿场强, 存在静电放电风险; 对不同直径混同料筒的临界放电药面高度进行模拟计算, 得到了临界放电药面高度随料筒直径的变化曲线, 结果表明直径 100, 200, 300, 400, 500 mm 的料筒, 临界放电药面高度分别为 81, 46, 42, 41, 40 mm, 直径超过 500 mm 时, 临界放电药面高度基本维持在 40 mm。

**关键词:** 发射药; 混同; 静电场; 风险评估; 仿真

中图分类号: TJ55; TM151

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2018263

### 1 引言

混同是发射药生产工艺中的重要工序, 是确保产品批量稳定性和均匀性的关键过程之一<sup>[1]</sup>。现有的人工混同方式药量大、人员多, 由于药粒与设备及药粒之间的摩擦, 药粒将产生较高静电电压, 可达上万伏, 历史上曾发生多次重大安全事故, 如: 某单基药混同工序, 由于静电灾害发生爆炸, 死亡 27 人, 重伤 35 人, 轻伤 200 余人<sup>[2]</sup>。人工混同已成为国防科技工业的重大危险源。为消除这一重大隐患、提升生产过程本质安全水平, 有关生产单位研制了自动化混同工艺技术<sup>[3]</sup>, 该技术采用自动化操作, 利用重力将发射药多次通过不锈钢分配器均匀地等分、混合, 从而实现批量产品粒度、质量的混合均匀, 目前该技术已用于有石墨包覆的发射药自动混同生产。但对于部分未经石墨包覆的发射药, 由于其高绝缘性, 在反复通过分配器的过程中,

将产生大量静电电荷, 存在极大的静电风险。为解决未经石墨包覆的发射药自动化混同工艺难题, 急需开展防静电技术研究。

自动化混同设备一般为不锈钢材质, 通过接地可杜绝静电火花放电的发生; 无人化操作方式, 可避免人体接近物料导致的刷型放电的产生。因此自动化混同过程中的静电放电风险主要为设备内发射药自身由于电荷量积累而产生的锥形放电。锥形放电是当物料电荷量达到一定量值时, 在物料与空气或容器界面的静电场强超过空气击穿强度而发生的放电现象<sup>[4-5]</sup>。目前国际上比较先进的安全风险评估方法是将粉体静电场模型化, 使用有限单元法或差分法, 对电场进行离散化处理, 再利用数值计算技术分析、求解料仓内的电场分布。目前, 完成这项工作并公开发表研究成果的, 主要有: Glor 与 Kuttler<sup>[6]</sup>建立了聚合物粉体颗粒在筒仓内的静电场仿真模型并进行了计算; 孙可平<sup>[7-8]</sup>提出了石化行业粉体料仓电场模型, 将粉体带电量、筒仓尺寸等因素融为一体, 对电场分布进行了计算与分析。这种方法摒弃了单点测量仓内电场的传统方法, 完成了粉体料仓内电场数值计算, 从而能够计算仓内任意位置、任意时刻的电场强度与电势, 并能对大量数据进行分析、处理和作图, 预测仓内电场强度最大值可能出现

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2018-10-25

网络出版日期: 2019-01-22

基金项目: 国防科工局基础产品创新计划火炸药科研专项项目(科工三司[2017]1315)

作者简介: 卫水爱(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事燃烧爆炸品静电防护技术研究。e-mail: 53064070@qq.com

引用本文: 卫水爱, 孙磊, 李文海, 等. 发射药混同过程静电性能测试及风险评估[J]. 含能材料, 2019, 27(6):493-500.

WEI Shui-ai, SUN Lei, LI Wen-hai, et al. Electrostatic Performance Test and Risk Assessment of Propellant Mixing Process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(6):493-500.

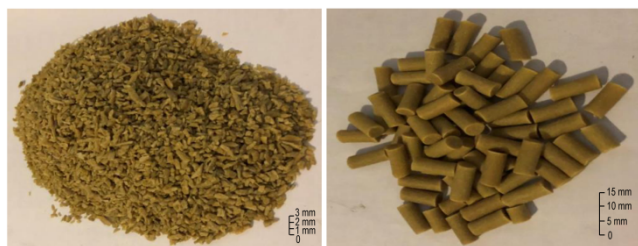
的区域与时间。这就为风险评估奠定了开拓性的技术基础。我国火炸药行业尚未开展该种风险评估方法的应用,生产过程中的静电锥形放电尚无有效的控制措施。

为此,本研究选取未包覆的11/7发射药为代表产品,自主设计测试装置,开展介电常数、电阻率、静电电荷量等参数的测试试验,在此基础上,利用ANSOFT软件对混同工序中典型药筒进行静电场仿真计算,得到静电场分布规律和曲线,对锥形放电风险进行分析与评估。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品

实验样品由兵器某工厂提供,包括11/7发射药药粉和成品药粒两种,如图1所示。其中成品药粒平均长度为13.5~15.6 mm;药粉为经破碎的成品,平均粒径为1 mm。测试前将样品在50 °C保温干燥24 h。



a. 11/7 propellant powders b. 11/7 propellant products  
图1 11/7发射药药粉和成品药粒

Fig.1 11/7 propellant powders and products

### 2.2 电阻率测试

材料的电阻率 $\rho$ 是表征材料导电性能的物理量,包括表面电阻率 $\rho_s(\Omega)$ 和体积电阻率 $\rho_v(\Omega \cdot m)$ 。

#### 2.2.1 装置与仪器

测试系统由DSM8104超高电阻测试仪和自制的适用于粉体电阻率测量的三电极测试装置组成。三电极测试装置主要材料为聚四氟乙烯和304不锈钢,装置结构示意图和实物图分别如图2和图3所示。其中保护电极直径 $d_1$ 为74 mm,不保护电极直径 $d_2$ 为90 mm,保护电极和被保护电极的间距 $s$ 为5 mm,容器内部高度 $l$ 为50 mm。测试样品厚度 $t$ 为45 mm。

#### 2.2.2 试验过程及计算方法

测试时环境温度为24 °C,相对湿度为25%。测试依据GB/T1410-2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》进行,采用100 V电压,保护电极接地,不保护电极接线柱接超高电阻测试仪的输入

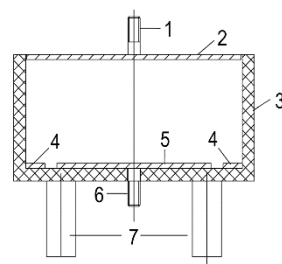


图2 三电极测试装置结构示意图

1—不保护电极接线柱,2—不保护电极,3—绝缘容器,4—保护电极,5—被保护电极,6—被保护电极接线柱,7—绝缘支脚

Fig.2 Schematic diagram of three electrodes test device

1—unprotected electrode terminal, 2—unprotected electrode, 3—insulated container, 4—protective electrode, 5—protected electrode, 6—protected electrode terminal, 7—insulated foot



图3 三电极测试装置实物图

Fig.3 Physical image of three electrodes test device

端,被保护电极接线柱接输出端,分别将两种样品注入三电极测试装置,施加电压1 min后读取表面电阻 $R_s(\Omega)$ 和体积电阻 $R_v(\Omega)$ 。重复测试三次,取平均值。根据电极尺寸分别计算出表面电阻率和体积电阻率,公式<sup>[9]</sup>如下:

$$\rho_s = \frac{P}{s} R_s = \frac{\pi(d_1 + g)}{s} R_s \quad (1)$$

$$\rho_v = \frac{A}{t} R_v = \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4t} R_v \quad (2)$$

式中, $P$ 为被保护电极的有效周长,m; $A$ 为被保护电极的有效面积,m<sup>2</sup>。

### 2.3 相对介电常数测试

物质的相对介电常数( $\epsilon_r$ )是指在同一电容器中分别以该物质和真空为介质时电容的比值,它用于衡量物料在电场中贮存静电能的相对能力,是介质材料重要的性能指标之一<sup>[10]</sup>。同时,介电常数是研究物质静电危险性的重要参数。

#### 2.3.1 装置与仪器

测试系统由TH2618B型高精度电容测量仪和电容测试装置组成,测试频率10 kHz,具有良好的测试

稳定性;电容测试装置施压极板和测量极板直径为74 mm,两者之间高度差为50 mm,装置结构示意图和实物图分别如图4和图5所示。

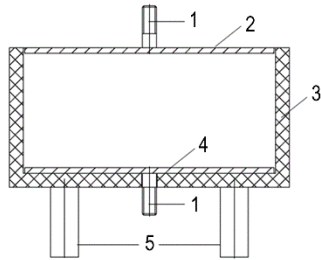


图4 电容测试装置结构示意图

1—施压接线柱,2—施压电极板,3—绝缘空腔,4—测量电极板,5—绝缘支脚

Fig.4 Schematic diagram of capacitance test device

1—pressure terminal,2—pressure electrode plate,3—insulated container,4—measuring electrode plate,5—insulated foot



图5 电容测试装置实物图

Fig.5 Physical image of capacitance test device

### 2.3.2 实验过程

采用电容比较法,即首先测量电容装置为空气时的电容  $C_0$ (F)。然后,在同样的极板距离间分别加入实验样品测得电容  $C_1$ (F),重复测试三次,取平均值,通过式(3)<sup>[11]</sup>计算可得物质的相对介电常数:

$$\epsilon_r = C_1 / C_0 \quad (3)$$

## 2.4 电荷量测试

### 2.4.1 装置与仪器

为保障实验测试过程安全,本研究设计了一套全自动的滑槽摩擦起电测试装置,如图6和图7所示。该装置能够实时测试试样的质量和电荷量( $Q, \mu\text{C}$ ),采用计算机连续记录和数据处理。

滑槽材质为304不锈钢,长度1 m,宽0.2 m,倾斜角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ 可调。1#和2#测试料筒结构相同,均为双层结构,材质为304不锈钢,内外筒间绝缘,内筒连接电荷量测试仪,外筒接地,料筒底部安装有阀板,可自动控制开启,体积为5 L。电荷量测试仪为JDY-2A型,测量范围1 nC~20  $\mu\text{C}$ ,测试前经过计量校准。

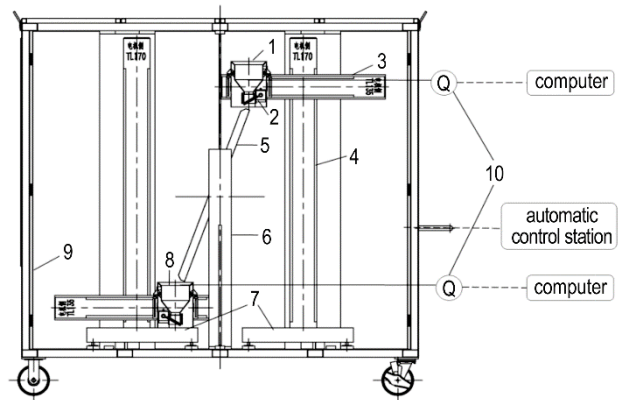


图6 自动上下料滑槽摩擦起电测试装置结构示意图

1—1#测试料筒,2—下料开关板,3—横向导轨,4—竖向导轨,5—滑槽,6—中心轴,7—电子秤,8—2#测试料筒,9—屏蔽箱,10—电荷量测试仪

Fig.6 Schematic diagram of automatic loading and unloading chute friction electric test device

1—test silo 1#,2—switch board,3—horizontal guide rail,4—longitudinal guide rail,5—chute,6—central axis,7—electronic scale,8—test silo 2#,9—shield box,10—charge meter



图7 自动上下料滑槽摩擦起电测试装置实物图

Fig.7 Physical image of automatic loading and unloading chute friction electric test device

### 2.4.2 实验过程

实验样品为11/7发射药成品药粒,实验药量2 kg。实验环境温度 $33^\circ\text{C}$ ,相对湿度37%。测试时,将电荷量测试仪连接至1#和2#测试料筒内筒,通过自动控制程序将滑槽调至一定角度,由文献[12]可知, $45^\circ$ 角是最容易积累电荷的角度,因此,本研究选取 $45^\circ$ 作为测试角度,1#测试料筒自动调至高位,2#测试料筒调至低位,自动控制1#料筒的下料,2#测量料筒自动检测电荷量并传输至计算机,同时自动精确称量物料质量。测试完毕后将1#料筒和2#料筒进行位置反转,放料并进行电荷量测量,直至电荷量趋于饱和稳定,获得不同滑槽摩擦长度( $L, \text{m}$ )的电荷量曲线。



### 3 结果与讨论

#### 3.1 电阻率

根据 2.1 的测试过程和公式(1)、(2)计算得到 11/7 发射药的表面电阻率和体积电阻率,结果如表 1 所示。

表 1 11/7 发射药的电阻和电阻率

Table 1 Resistance and resistivity of 11/7 propellant

parameters	11/7 propellant powder	11/7 propellant products
$R_s/\Omega$	$2.24 \times 10^{10}$	$2.13 \times 10^{10}$
$\rho_s/\Omega$	$1.11 \times 10^{12}$	$1.06 \times 10^{12}$
$R_v/\Omega$	$1.83 \times 10^{11}$	$1.70 \times 10^{11}$
$\rho_v/\Omega \cdot m$	$2.00 \times 10^{10}$	$1.87 \times 10^{10}$

由表 1 可以看出,11/7 发射药药粉与成品药粒电阻及电阻率几乎相同,两者表面电阻率均超过了  $10^{12} \Omega$ ,体积电阻率超过了  $10^{10} \Omega \cdot m$ ,都属于绝缘材料<sup>[12]</sup>,易起电且难耗散,混同过程中不能通过静电接地方式消除静电。

#### 3.2 相对介电常数

药粉和成品药粒在不同堆积密度时的相对介电常数曲线如图 8 所示。

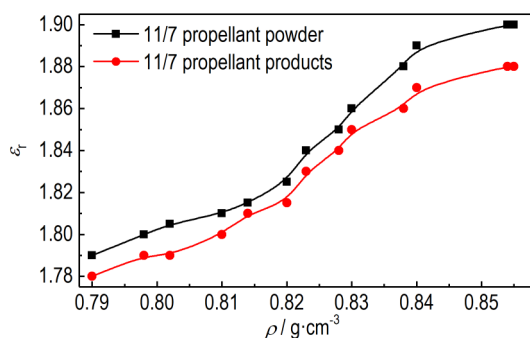


图 8 11/7 发射药药粉和成品药粒相对介电常数随堆积密度的变化

Fig. 8 Change of the relative dielectric constants with bulk densities of 11/7 propellant powders and products

由图 8 可见,两种样品的相对介电常数表现出相同规律,即随着堆积密度的增加,相对介电常数随之增大,这是由于堆积密度增大,介质之间空气间隙减少,介电性能增强。11/7 发射药药粉和成品药粒的相对介电常数的最大值分别为 1.9 和 1.88,表明两者均具有较强的静电储存能力,而由于药粉的粒度小于成品药粒,堆积状态空气间隙较少,导致其相对介电常数大于成品药粒。

#### 3.3 电荷积累量

荷质比是物质单位质量所带的电荷量,11/7 发射

药成品药粒电荷积累量测试结果如图 9 所示。

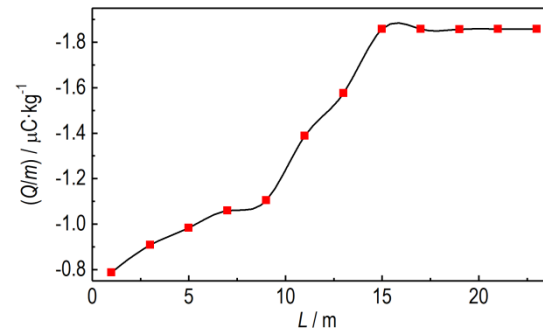


图 9 11/7 发射药成品药粒电荷积累量随摩擦距离的变化

Fig. 9 Change of the charge accumulation with friction distance of 11/7 propellant products

由图 9 可以看出,11/7 发射药带负电荷,说明其容易得到电子,电荷积累量随着摩擦次数和距离的增加,呈现逐步增大、逐渐恒定的趋势,当摩擦距离超过 15 m 后达到静电饱和,电荷量基本恒定不变,饱和荷质比( $Q/m$ )为  $-1.85 \mu C \cdot kg^{-1}$ 。表明发射药随着药粒之间、药粒与滑槽之间摩擦时间和长度的增加,静电电荷量逐渐积聚且难以耗散,当摩擦距离超过一定长度时电荷量达到饱和。在自动化混同过程中,药粒将反复通过分配器进行混合,摩擦长度远超过 15 m,发射药极易达到饱和荷质比。

#### 3.4 11/7 发射药静电场仿真计算

##### 3.4.1 数值计算模型及参数

根据发射药静电场理论,发射药中电场强度分布遵从高斯定理<sup>[14]</sup>:

$$\varepsilon \nabla \cdot E = \rho_f \quad (4)$$

式中, $\rho_f$ 为发射药的自由电荷密度, $C \cdot m^{-3}$ ;  $E$ 为发射药内的总电场强度矢量, $V \cdot m^{-1}$ ;  $\varepsilon$ 为发射药的介电常数, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ , $\varepsilon_r$ 为发射药的相对介电常数, $\varepsilon_0$ 为真空介电常数。由公式(4)可以看出,发射药的电场强度由电荷密度和介电常数决定。

ANSOFT MAXWELL 静电场数值分析是基于静电场高斯定理,在满足一定边值关系的条件下,通过给定的电荷密度和介电常数,进行微分计算,得到场强及电位的分布规律。

针对发射药混同过程中典型的不锈钢圆柱形料筒进行静电场仿真计算,料筒直径  $d$  为 100~1000 mm,料筒高度  $H$  为 100~1000 mm,壁厚为 2 mm,料筒接地,仿真计算二维模型如图 10 所示。

计算中涉及到的材料包括 11/7 发射药和空气,均选用 PLANE121 二维电场单元,其为 8 节点四边形单

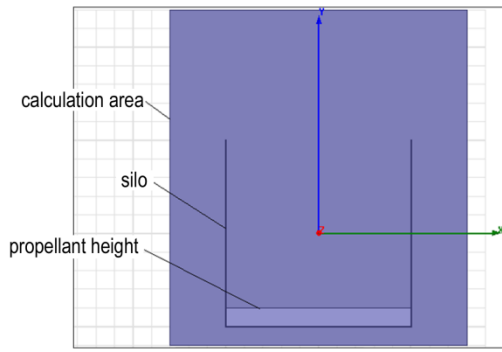


图 10 发射药混同料筒二维模型图

Fig.10 2D model diagram of propellant mixing silo

元,自由度为电压。11/7发射药的参数采用上述实验值,即相对介电常数 1.88,荷质比 $-1.85 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根

据工厂提供的数据,11/7发射药的堆积密度为 $0.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,经计算得到11/7发射药的自由电荷密度为 $1.665 \times 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于实验值是在实际空气中测量得到的,因此所建模型为简化模型,不再考虑药粒间空气的影响,而假设其间为均匀介质。

### 3.4.2 仿真计算结果

#### 3.4.2.1 料筒静电场计算

在实际生产中,大部分混同料筒直径为1000 mm,因此选取1000 mm的料筒直径进行计算。选取11/7发射药药面高度 $h$ 分别为30,40,100,200,300,400,500,600,700,800,900 mm模拟计算静电场的分布规律,获得的电场强度分布云图见图11,料筒内最大

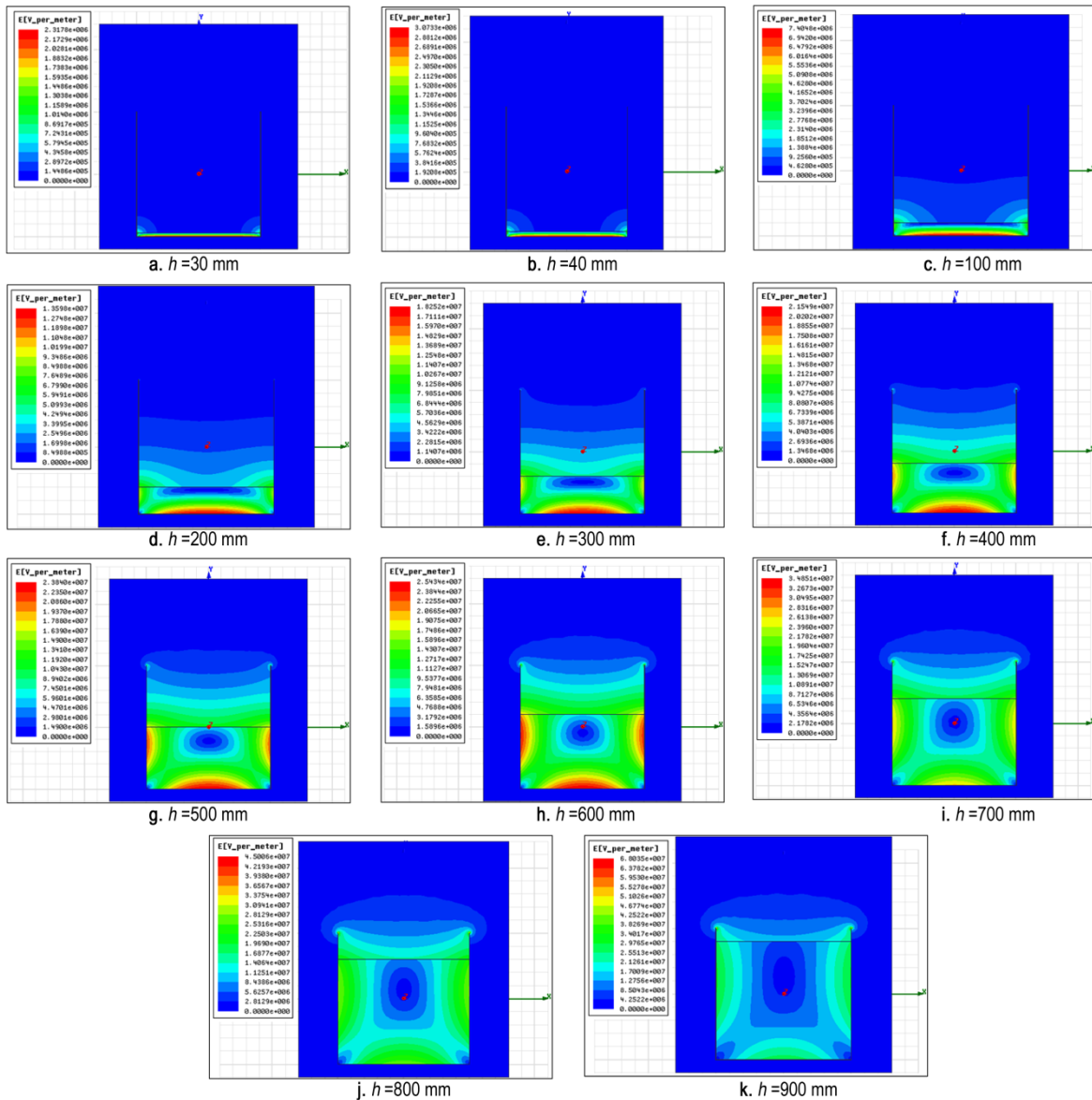


图 11 混同料筒内不同药面高度的电场强度云图

Fig.11 Cloud chart of the electrostatic field intensity at different heights of powder in the mixing silo

电场强度随着药面高度的变化曲线见图12。

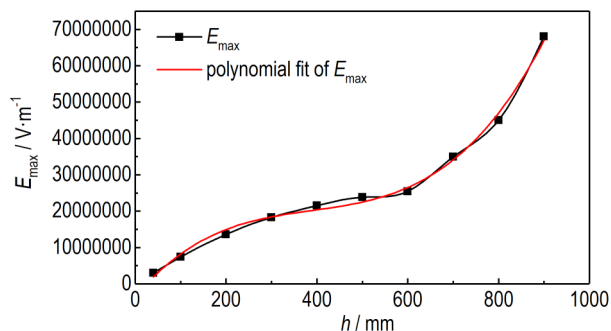


图12 11/7发射药混同料筒内最大场强随药面高度的变化  
Fig.12 Change of the maximum field strength with powder's height in the mixing silo of 11/7 propellant

由图11可以看出,随着发射药厚度的增加,料筒内各处电场强度也随之增大;混同料筒内最大场强出现在筒斗底部中间位置。这是因为根据电场强度叠加原理<sup>[15]</sup>,某点处的静电场强为多个点电荷产生的场强叠加。将混同料筒内发射药看作是若干个独立的点电荷,对于一定直径的料斗,药面越高,发射药的量越多,即点电荷越多,因此在某点处叠加的场强越大。当药面高度不变时,各点电荷对料斗底部中心点的贡献最大,因此料斗底部中心部位电场强度最大。

当药面高度为40 mm时,料筒内最大场强为 $3.07 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,已经达到空气击穿场强,表明在11/7发射药灌充到40 mm料高时,料筒内部就有可能发生放电,且随着发射药厚度的增加,静电放电风险越大。

由图12可以看出,料筒内最大场强随11/7发射

药药面高度的增大而增大,根据三项式 $y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$ 曲线拟合出最大场强随药面高度的变化公式:

$$E_{\max} = -3.47 \times 10^6 + 1.47 \times 10^5 h - 333h^2 + 0.28h^3 \quad (5)$$

该公式拟合系数为0.99382,说明拟合度较好。对于11/7发射药在直径1000 mm的料筒内任一药面高度时的最大场强,可以根据该公式进行计算。

### 3.4.2.2 不同直径料筒的临界放电药面高度规律

临界放电药面高度 $h_c$ 是当料筒内电场强度达到空气击穿场强时的药面高度。针对100~1000 mm直径的混同料筒进行模拟计算,得到临界放电药面高度的电场强度分布见图13。可见料筒内最大电场强度发生在料仓底部中心位置,是锥形放电最先发生的部位。

由图13可以得到临界放电药面高度随料筒直径的变化曲线,如图14所示。由图13和图14可以看出,临界放电药面高度随着料筒直径的增加而减小,即大直径料筒更容易发生锥形放电,且当直径大于500 mm时,临界放电药面高度基本维持在40 mm。这是因为根据高斯定理,空间某点的总电场强度与物体所带电荷量呈正比,与各点与某点的距离的平方成反比,由图13可知,发射药混同料筒内最大场强出现在料筒底部中心部位,该部位的场强取决于一定半径范围内的物料电荷量,而超出该范围的静电电荷对该处场强影响较小,导致当料筒直径超过500 mm后,临界放电药面高度基本趋于恒定。在直径100~1000 mm内,

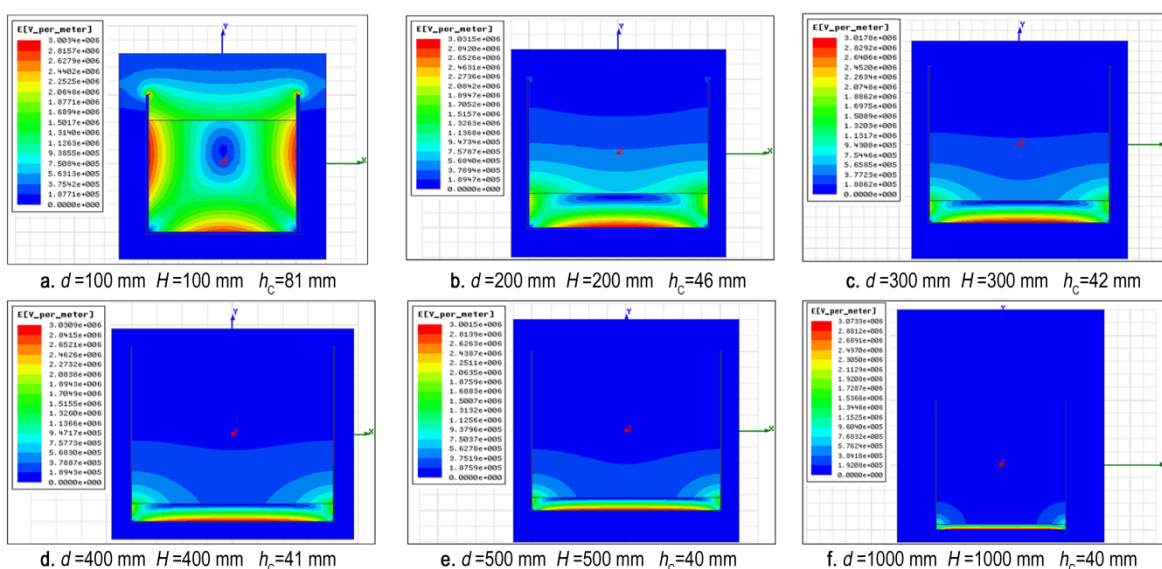


图13 不同直径料筒内11/7发射药达到空气击穿场强时的电场强度分布  
Fig.13 Distribution of 11/7 propellant's electric field strength in silos with different diameters at the air breakdown field strength

100 mm 直径的混同料筒内临界放电药面高度最大, 为 81 mm。在实际数十吨发射药的混同过程中, 单料筒的药量将达到 500 kg 以上, 堆积体积将超过  $0.25 \text{ m}^3$ , 对于直径 1000 mm 的料筒, 药面高度将达到 310 mm 以上, 远远超过临界放电药面高度数值 40 mm, 因此混同料筒内将会发生静电锥形放电, 存在静电引燃引爆的风险。

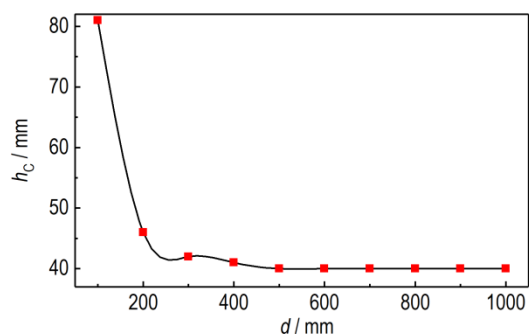


图 14 临界放电药面高度随料筒直径的变化

Fig.14 Change of the critical discharge powder's height with the diameter of silo

## 4 结论

(1) 11/7 发射药成品药粒体积电阻率为  $1.87 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ , 表面电阻率为  $1.06 \times 10^{12} \Omega$ , 为静电绝缘物质, 易起电且难以耗散; 相对介电常数达到 1.88, 表明其具有较强的静电储存能力。

(2) 模拟 11/7 发射药混同摩擦的实验结果表明, 随着摩擦距离的增大, 静电带电量逐渐增大, 当摩擦距离为 15 m 时, 静电电荷量达到饱和, 饱和荷质比为  $-1.85 \mu\text{C} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 。

(3) 仿真计算结果表明, 临界放电药面高度随着料筒直径的增加而减小, 100 mm 直径的混同料筒内临界放电药面高度最大, 为 81 mm, 当直径大于 500 mm 时, 临界放电药面高度基本维持在 40 mm。

(4) 实际自动化混同过程中, 为满足工艺需求, 11/7 发射药料筒中药面的高度达到 310 mm, 远远超过本研究得到的临界放电药面高度, 因此混同料筒内将会发生静电锥形放电, 存在静电引燃引爆的风险。为减小静电放电引燃风险, 可采取控制药面高度的“薄层混同”方式, 或对 11/7 发射药进行静电改性, 降低电阻率和荷质比, 从而防止静电放电引发燃爆事故。

### 参考文献:

[1] 胡凌艳, 张双保, 潘杰等. 小粒发射药混同工序的安全性[J]. 四川

兵工学报, 2009, 10(30): 35-36.

HU Ling-yan, ZHANG Shuang-bao, PAN Jie, et al. Safety of small particle propellant mixing process[J]. *Journal of Sichuan Armed Forces*, 2009, 10(30): 35-36.

[2] 张国顺, 王泽溥. 火炸药及其制品燃烧爆炸事故及其预防措施(上册)[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 123-127.

ZHANG Guo-shun, WANG Ze-pu. Combustion and explosion accidents of explosives and their products and their preventive measures (Volume 1) [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2009: 123-127.

[3] 谭敏, 邓维平, 张永明. 粒状发射药自动化混同工艺混合均匀度[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 81-83.

TAN Min, DENG Wei-ping, ZHANG Yong-ming. Granular propellant automated mixing process mixing uniformity[J]. *Journal of Sichuan Armed Forces*, 2009, 30(3): 81-83.

[4] 孙可平. 粉体静电学国内外研究动态与进展[J]. 物理, 2000, 29(6): 364-368.

SUN Ke-ping. Research developments and progress on powder electrostatics[J]. *Physics*, 2000, 29(6): 364-368.

[5] Glor M, Maurer B. Ignition tests with discharges from bulked polymeric granules in silos (cone discharge) [J]. *Journal of Electrostatics*, 1999, 30(5): 123-133.

[6] Kuttler A, Glor M. Modelling of the electric field in silos filled with polymeric granules[J]. *Journal of Electrostatics*, 1993, 30: 285-296.

[7] Sun K P, Yu G F. Research on field calculation & safety evaluation in powder silo [J]. *Journal of Electrostatics*, 1998, 44(1-2): 119-123.

[8] Sun K P, Liu Q Z, Li X W. Simulation test on charge density and surface potential in an oil tank during filling operation [J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(2-3): 340-341.

[9] 刘存礼, 王书平, 杨洁, 等. 静电计量与测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 63-64.

LIU Cun-li, WANG Shu-ping, YANG Jie, et al. Electrostatic Metrology and measurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 63-64.

[10] 孙绪兵. 部分聚合物结构与介电常数关系研究[J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(6): 26-29.

SUN Xu-bing. Study on the relationship between partial polymer structure and dielectric constant [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2015, 32(6): 26-29.

[11] 罗宏昌, 毕载俊, 伍学正. 静电实用技术手册[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990: 284.

LUO Hong-chang, BI Zai-jun, WU Xue-zheng. Electrostatic technical manual [M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 1990: 284.

[12] 李志敏. 起爆药静电响应规律与安全设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

LI Zhi-min. The response law and safety designs of primary explosives to static electricity [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

[13] 吴宗汉. 基础静电学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 172.

WU Zong-han. Basic electrostatics [M]. Beijing: Peking University Press, 2010: 172.

[14] 卫水爱, 白春华, 李春光. 发射药生产过程中静电锥体放电规律数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(5): 892-899.

WEI Shui-ai, BAIC hun-hua, LI Chun-guang. Simulation of electrostatic cone discharge in propellant production process [J].



*Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 892–899.

[15] 罗春荣,陆建隆.电动力学(第3版)[M].西安:西安交通大学出版社,2000: 5.

LUO Chun-rong, LU Jian-long. *Electrodynamics* (the 3 edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 5.

## Electrostatic Performance Test and Risk Assessment of Propellant Mixing Process

WEI Shui-ai<sup>1,2</sup>, SUN Lei<sup>2</sup>, LI Wen-hai<sup>2</sup>, LI Chun-guang<sup>2</sup>, BAI Chun-hua<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*; 2. *Safety Technology Research Institute of Ordnance Industry, Beijing 100053, China*)

**Abstract:** To prevent accidents and assess the risk of static disasters in propellant mixing process, we designed devices to test electrostatic parameters such as resistivity, dielectric constant and charge accumulation. 11/7 single-base propellant was chosen to be tested as a typical product. It shows that the volume resistivity, surface resistivity and dielectric constant of 11/7 single-base propellant are  $1.87 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $1.06 \times 10^{12} \Omega$ , and 1.88, respectively, and the saturated charge-to-mass ratio at friction state of chute is  $-1.85 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ . ANSOFT MAXWELL software was used to simulate the electrostatic field in mixing silo of 11/7 propellant, obtaining the change curve of the maximum field strength with powder's height in 1000 mm diameter mixing silo. Results show that the electric field strength increases with the increase of powder's height. When the powder's height is 40 mm, the air breakdown field strength is reached and there is a risk of electrostatic discharge. In addition, the critical discharge powder's heights at different diameters of mixing silos were simulated, and the corresponding change curve was also obtained. It shows that the critical discharge powder's heights are 81, 46, 42, 41 mm and 40 mm when the diameters of material silo are 100, 200, 300, 400 mm and 500 mm, respectively. However, when the diameter is greater than 500 mm, the critical discharge powder's height reasonably maintains at 40 mm.

**Key words:** propellant; mixing; electric field; risk assessment; simulation

**CLC number:** TJ55; TM151

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018263

(责编:姜梅)